

1.1 认识电路

1.1.1 电路的组成及各部分的作用



播放动画

一个最简单的电路由电源、负载、中间环节3个部分组成。(1) 电源：是将其他形式的能转换成电能的装置。它是电路中能量的提供者，如干电池、蓄电池、发电机或信号源等

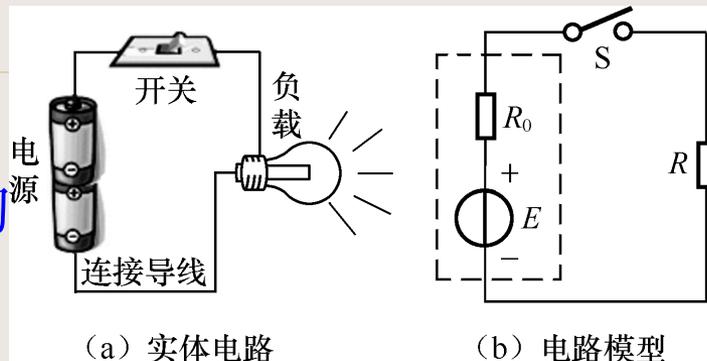


图 1-1 手电筒电路

(2) 负载：是将电能转换成其他形式能的器件或设备，是电路中能量的消耗者，如电灯、电炉、电动机等。负载是各类用电器的统称。

(3) 中间环节：包括连接导线、控制、保护装置等。连接导线的作用是输送、分配电能。控制、保护装置的作用是控制电路的通断、保护及检测电路等，如开关电器、熔断器、仪器仪表等。



1. 电位

任选电路中的一点 o 为参考点，则电路中的某点 a 与参考点 o 间的电压就称为 a 点的电位，用 V_a 表示，单位也是伏特。

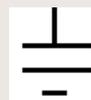
参考点的电位规定为零，故参考点又称为零电位点。

。

任选电路中的一点 o 为参考点，则电路中的某点 a 与参考点 o 间的电压为 u_{ao}

2. 参考点的选择

物理学中常选无限远处或大地为参考点。



电工学中若研究的电路有接地点，就选择接地点为参考点，用符号 \perp 表示。



电子线路中，常取若干导线汇集的公共点或机壳作为电位的参考点，用符号  表示。

3. 电压与电位的关系

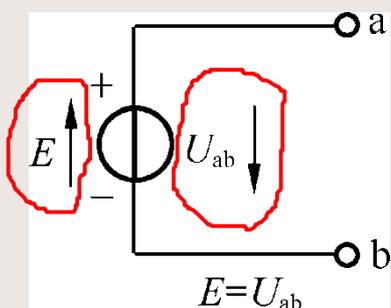
电路中 a、b 两点间的电压等于 a、b 两点的电位之差，即

$$u_{ab} = V_a - V_b$$

电位是相对的，随参考点发生变化；但任意两点间的电压是绝对的，不随参考点变化。



3. 电源电动势和电压的关系



电场力将单位正电荷从 a 点移到 b 点所做的功，称为 a、b 两点间的**电压**，用 U_{ab} 表示。电位降低的方向为电压的实际方向。

电源将正电荷从电源负极经电源内部移到正极的能力用**电动势**表示，电动势的符号为 E

电动势的方向规定为在电源内部由**负极指向正极**

电压源对外电路的作用效果既可以用电动势表示，也可以用电压表示。

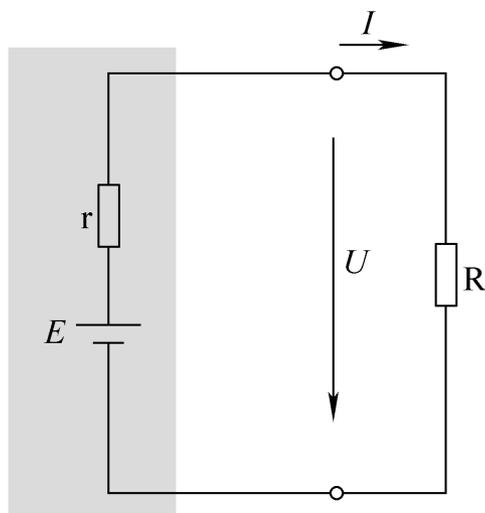
沿电动势的方向电位升高了 E 伏，沿电压的方向电位降低了同样的数值，故有

$$E = U_{ab}$$



全电路欧姆定律

全电路是含有电源的闭合电路。电源内部的电路称为**内电路**。电源内部的电阻称为**内电阻**，简称内阻。电源外部的电路称**外电路**，外电路中的电阻称为**外电阻**。



内容：

闭合电路中的电流与电源的电动势成正比，与电路的总电阻（内电路电阻与外电路电阻之和）成反比。

公式：

已知 E, r, R 求 电流

$$I = \frac{E}{R + r}$$

电源的外特性

电源端电压 U 与电源电动势 E

的关系为:

已知 E, r, I 求端电压

$$U = E - Ir = IR$$

可见，当电源电动势 E 和内阻 r 一定时，电源端电压 U 将随负载电流 I 的变化而变化。

一、电功

电流所做的功，简称电功（即电能），用字母 W 表示。

电流在一段电路上所作的功等于这段电路两端的电压 U 、电路中的电流 I 和通电时间 t 三者的乘积，即：

$$W = UIt$$

式中 W 、 U 、 I 、 t 的单位分别用 J 、 V 、 A 、 s 。

电能的另一个常用单位是千瓦时
(kW·h)，即通常所说的1度电，它
和焦耳的换算关系为

$$1 \text{ kW}\cdot\text{h} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

$$W = UIt$$

$$= Pt$$

$$1 \text{ 度} = 1 \text{ kW}\cdot\text{h} = 1000 \text{ W}\cdot\text{h}$$

$$t = \frac{W}{P}$$

$$\frac{1 \text{ 度电}}{500 \text{ W}} = \frac{1000 \text{ W}\cdot\text{h}}{500 \text{ W}} = 2 \text{ h}$$

假设你教室的电灯功率是
1000W，开灯 10 小时，求消耗多少电？假
设每度电 0.5 元，应该付多少电费？

$$P = 1000 \text{ W}$$

$$t = 10 \text{ h}$$

$$W = Pt = ? \text{ 度电}$$

$$\times 0.5 \text{ 元} = ? \text{ 元}$$

二、电功率

电流在单位时间内所作的功称为**电功率**，用字母 P 表示，单位为 W 。

$$\left\{ \begin{array}{l} p = \frac{W}{t} = UI \\ I = \frac{U}{R} \end{array} \right.$$

对于纯电阻电路，上式还可以写为

$$P = I^2 R \text{ 或 } P = \frac{U^2}{R}$$

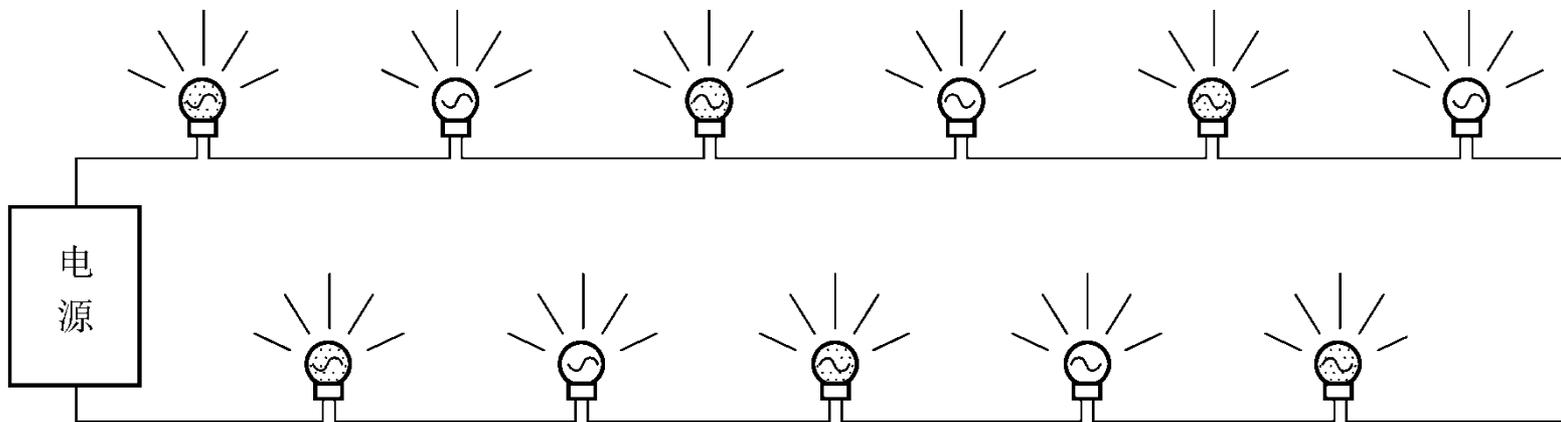
串 并

A large, stylized yellow swirl graphic composed of multiple curved lines, centered on the page. The swirl starts from the left and curves upwards and then downwards to the right.

§2-1 串联电路

一、电阻的串联

把多个元件逐个顺次连接起来，就组成了**串联电路**。



电阻串联电路的特点

(1) 电路中流过每个电阻的电流都相等。

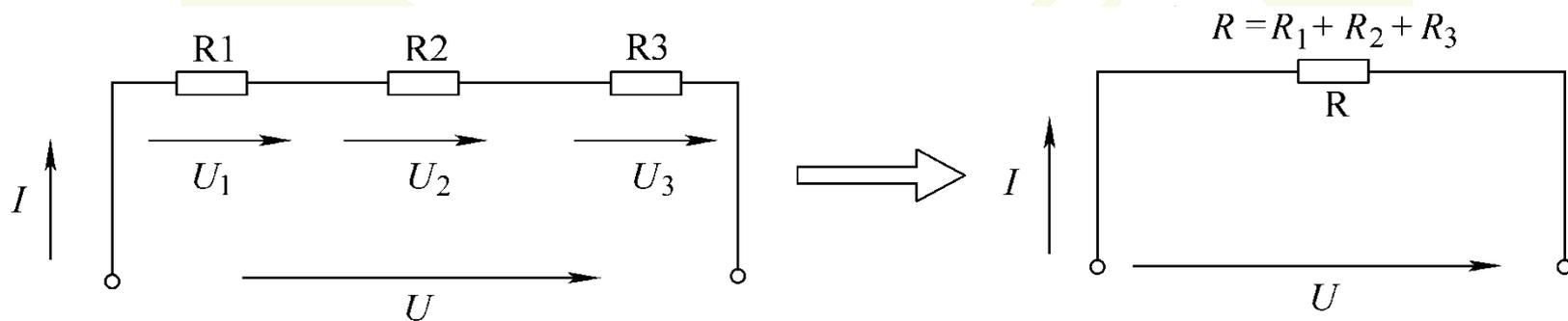
(2) 电路两端的总电压等于各电阻两端的分电压之和，即

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

电阻串联电路的特点

(3) 电路的等效电阻（即总电阻）等于各串联电阻之和，即

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

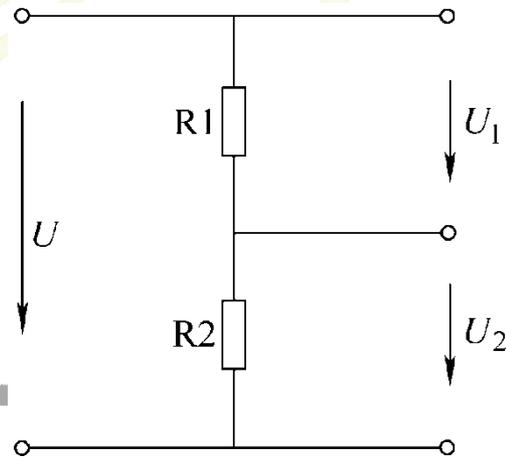


电阻串联电路的特点

(4) 电路中各个电阻两端的电压与它的阻值成正比，即

$$\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2} = \dots = \frac{U_n}{R_n}$$

上式表明，在串联电路中，阻值越大的电阻分配到的电压越大；反之电压越小。

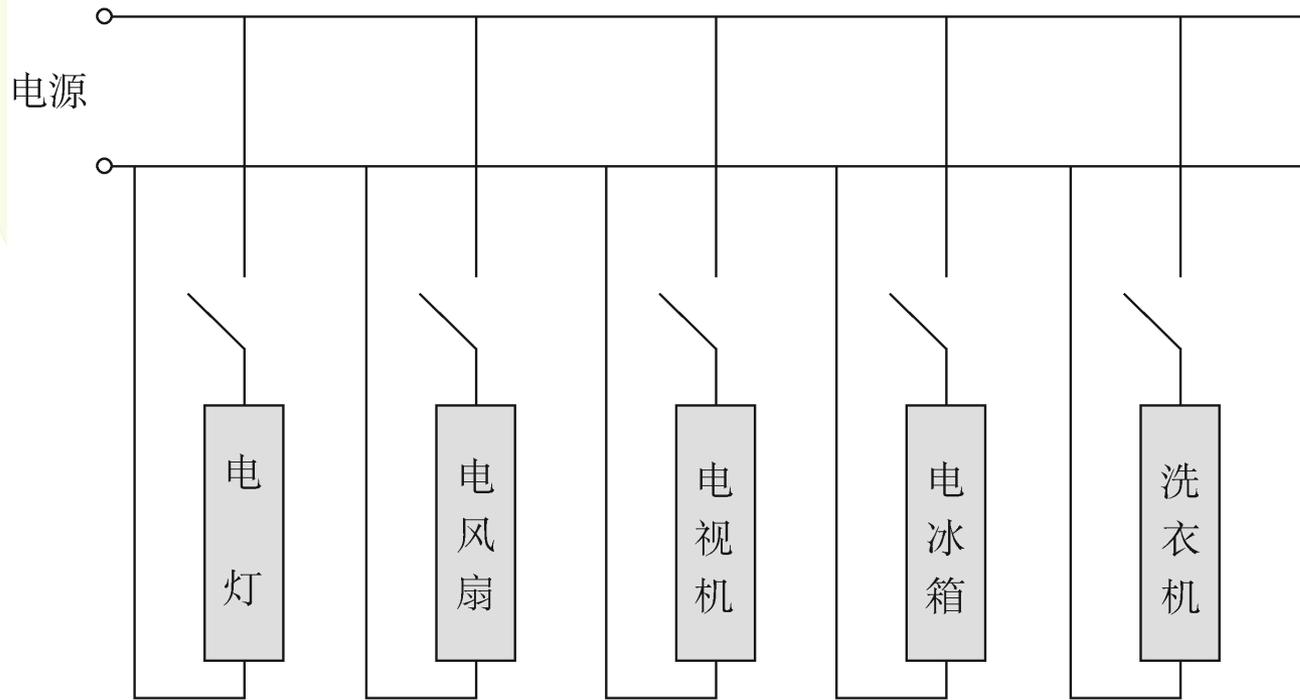


A large, stylized yellow swirl graphic composed of multiple curved lines, centered on the page. The text is overlaid on this graphic.

§2-2 并联电路

一、并联电路

把多个元件并列地连接起来，由同一电压供电，就组成了**并联电路**。



电阻并联电路的特点

(1) 电路中各电阻两端的电压相等，且等于电路两端的电压。

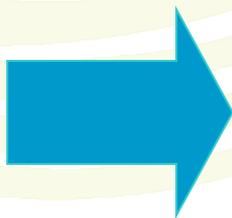
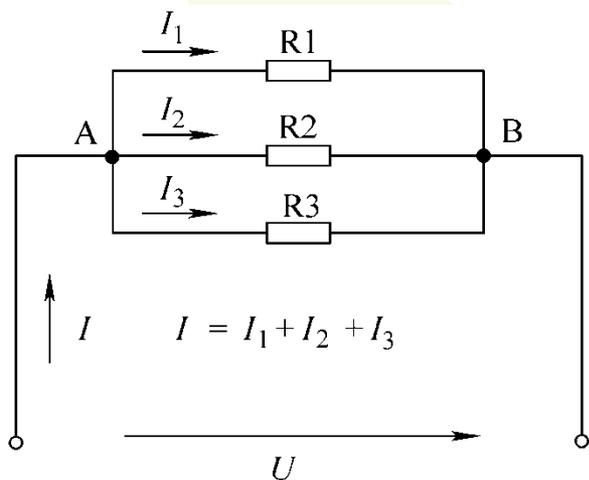
(2) 电路的总电流等于流过各电阻的电流之和，即

$$I = I_1 + I_2 + \cdots + I_n$$

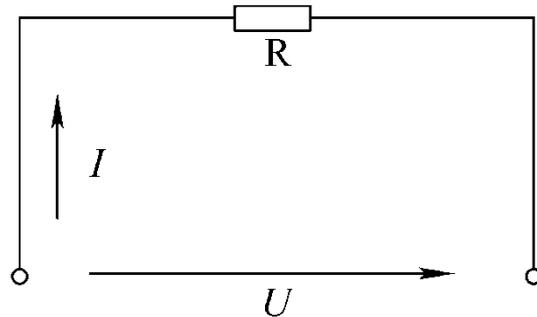
电阻并联电路的特点

(3) 电路的等效电阻（即总电阻）的倒数等于各并联电阻的倒数之和，即

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$



$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

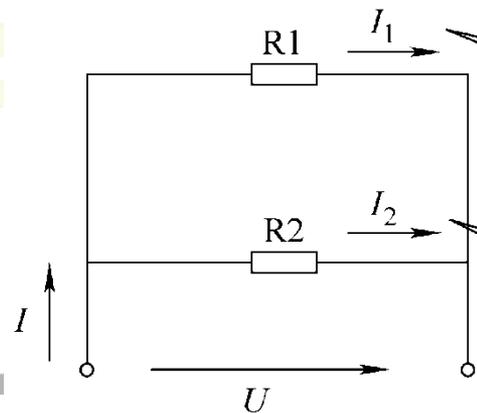


电阻并联电路的特点

(4) 电路中通过各支路的电流与支路的阻值成反比，即

$$IR = I_1 R_1 = I_2 R_2 = \dots = I_n R_n$$

上式表明，阻值越大的电阻所分配到的电流越小，反之电流越大。



串联电路

各电阻消耗的功率与电阻的阻值大小成正比，等效电阻消耗的功率等于各个串联电阻消耗的功率之和。

$$P_k = I^2 R_k$$

$$P = P_1 + P_2 + \cdots + P_n$$

并联电路

各电阻消耗的功率与电阻的阻值大小成反比，等效电阻消耗的功率等于各个并联电阻消耗的功率之和。

$$P_k = \frac{U^2}{R_k}$$

$$P = P_1 + P_2 + \cdots + P_n$$

有“220V、100W”和“220V、25W”白炽灯两盏，串联后接入220V交流电源，则（ ）

A、100W灯泡最亮
灯泡最亮

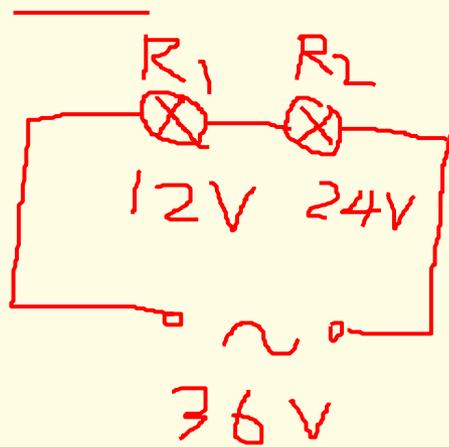
B、25W

C、两只灯泡一样亮
泡一样暗

D、两只灯

$$P = I^2 R \downarrow$$
$$R = \frac{U^2}{P_{\text{额}} \uparrow}$$

一只“10W12V”灯泡，若接在36V的电源上，要串联多大的电阻才能使灯泡正常工作？



$$I_1 = \frac{P_1}{U_1} \quad I_2 = I_1$$
$$R_2 = \frac{U_2}{I_2}$$

2.2 基尔霍夫定律



播放动画

2.2.1 几个有关的电路名词

(1) 支路：图 2-20 所示电路中，通过同一电流的每个分支称为支路。每一支路上通过的电流称为支路电流。如图 2-20 所示电路中的 I_1 、 I_2 、 I_3 均为支路电流。

(2) 节点：3 条或 3 条以上支路的连接点称为节点，图 2-20 所示电路中的节点 a 和节点 b。

(3) 回路：电路中任意一个闭合路径称为回路。如图 2-20 所示电路中的回路 I、回路 II 及 $a-R_2-E_2-b-E_1-R_1-a$ 构成的大回路 III。

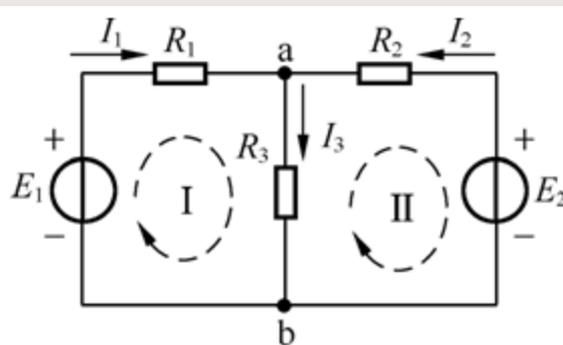


图 2-20 支路、节点回路和网孔



(4) 网孔：不能再分的回路称为网孔，即不包含其他支路的单一闭合路径。如图 2-20 所示电路中的回路 I、回路 II 即为网孔。大回路 III 不是网孔，因为它还能分成两个小回路 I、II。

图 2-20 所示电路有 3 条支路、2 个节点、3 个回路、2 个网孔。

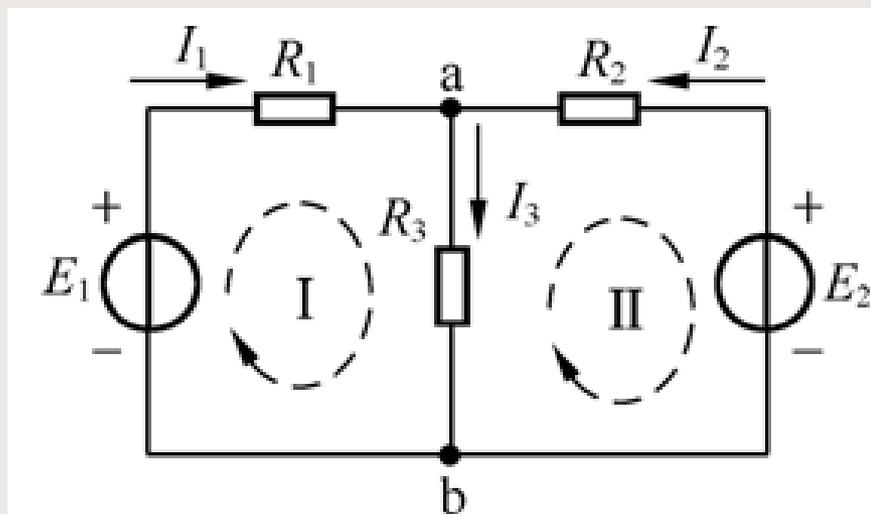


图 2-20 支路、节点回路和网孔



2.2.2 基尔霍夫电流定律 (KCL)

1. 基尔霍夫电流定律内容

在任一瞬时，流入任意一个节点的电流之和必定等于从该节点流出的电流之和，所有电流均为正。即

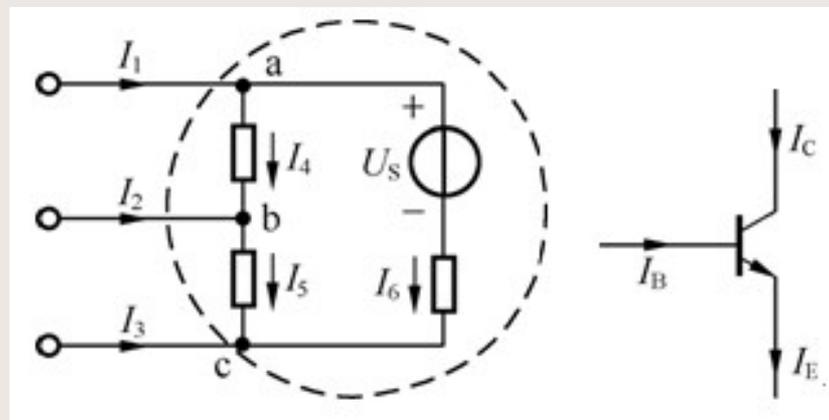
$$\sum I_{\text{入}} = \sum I_{\text{出}}$$

若规定流入节点的电流为正，流出节点的电流为负，则

$$\sum I = 0$$

2. 推广应用

KCL 也适用于包围几个节点的闭合面。如图 2-21 所示，其中的虚线圈内可看成是一个封闭面。



2.2.3 基尔霍夫电压定律 (KVL)

1. 定律内容

(1) 任何时刻沿着任一个回路绕行一周, 各电路元件上电压降的代数和恒等于零, 即 $\sum U = 0$

电压参考方向与回路绕行方向一致时取正号, 相反时取负号。

(2) 若电路中只包含线性电阻和电压源, 则回路中所有电阻上电压降的代数和恒等于回路中电压源电压的代数和, 即

$$\sum IR = \sum E$$

电流参考方向与回路绕行方向一致时 IR 前取正号, 相反时取负号; 电压源电压的方向与回路绕行方向一致时 E 前取负号, 相反时取正号。



2.3 支路电流法

支路电流法：是以支路电流为未知量，直接应用 KCL 和 KVL，分别对节点和回路列出所需的方程式，然后联立求解出各未知电流的方法。

一个具有 b 条支路、 n 个节点的电路，根据 KCL 可列出 $(n-1)$ 个独立的节点电流方程式，根据 KVL 可列出 $b-(n-1)$ 个独立的回路电压方程式。

例 2-8 电路如图 2-35 所示，已知 $U_{S1} = 70 \text{ V}$ ， $R_1 = 20 \Omega$
 $U_{S2} = 45 \text{ V}$ ， $R_2 = 5 \Omega$ $R_3 = 6 \Omega$ 计算各支路电流。



解：电路有 2 个节点、3 条支路、3 个回路（2 个网孔）。3 个支路电流是待求量。

(1) 列 KCL 方程
程 假定各支路电流

I_1 、 I_2 、 I_3 及参考方向如图 2-33 所示。根据 2 个节点，可列出 $2-1=1$ 个独立的 KCL 方程。

节点 a 有：
$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

(2) 列 KVL 方程 $I_1 + I_2 - I_3 = 0$

根据 2 个网孔，可列出 $3 - (2 - 1) = 2$ 个独立的 KVL 方程

$$I_1 R_1 + I_3 R_3 = U_{S1}$$

$$I_2 R_2 + I_3 R_3 = U_{S2}$$

$$I_1 = 2 \text{ A}$$

$$I_2 = 3 \text{ A}$$

$$I_3 = 5 \text{ A}$$

(3) 解联合方程组求

得

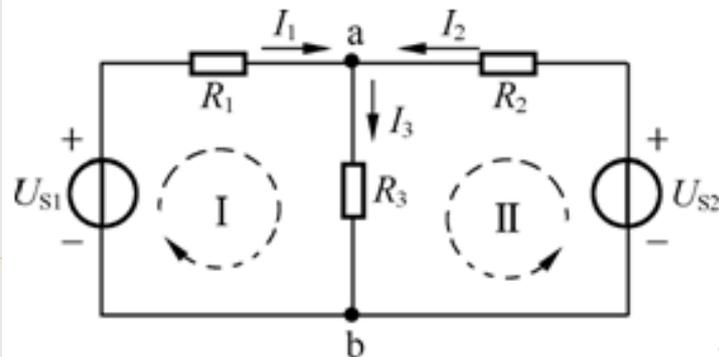
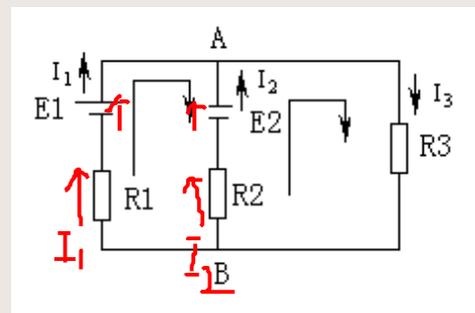


图 2-35 · 例 2-8 的图



$$I_1 R_1 - I_2 R_2 = E_1 - E_2$$

$$I_2 R_2 + I_3 R_3 = E_2$$





§2-7 电压源与电流源的等效变换

电压源与电流源模型的等效变换

一个实际电源的作用既可以用电压源模型表示，也可以用电流源模型表示。这两种电源模型在其二端口的伏安关系完全相等时可以进行等效变换。

等效的意义

下图所示电压源和电流源外接任何同样的负载，这两个电源都为该负载提供相同的电压和相同的电流，即

$$U = U', I = I'$$

对负载来说，该电压源和电流源是相互等效的，它们之间可以进行等效变换

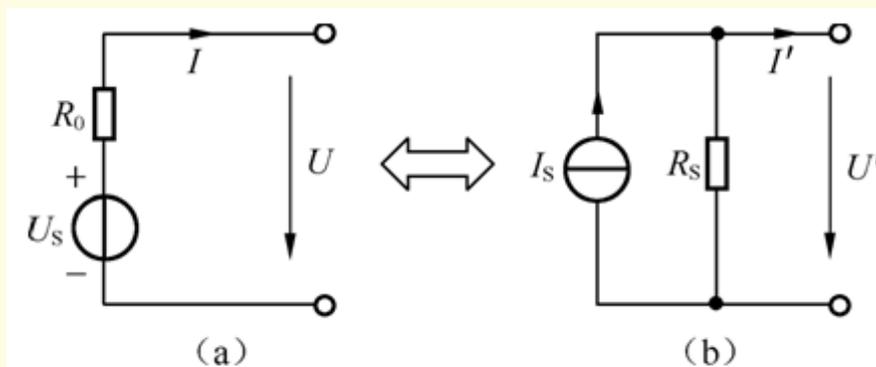


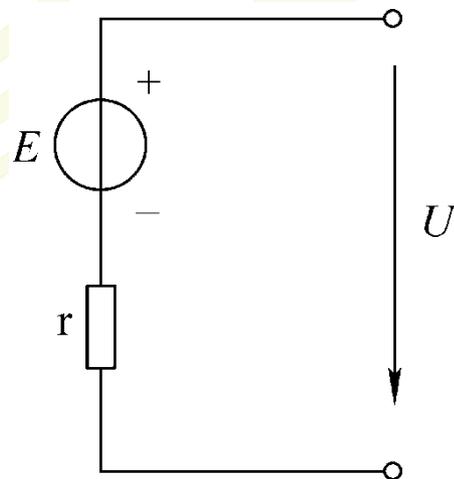
图 2-40 电压源和电流源的等效变换

将电源看作是电压源或是电流源，主要是依据电源内阻的大小。

一、电压源

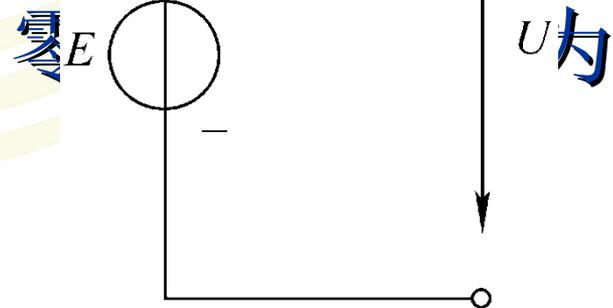
具有较低内阻的电源输出的电压较为恒定，常用电压源来表征。电压源可分为直流电压源和交流电压源。

实际电压源可以用恒定电动势 E 和内阻 r 串联起来表示。



实际电压源以输出电压的形式向负载供电，输出电压（端电压）的大小为 $U = E - Ir$ ，在输出相同电流的条件下，电源内阻 r 越大，输出电压越小。若电源内阻 $r = 0$ ，则端电压 $U = E$ ，而与输出电流的大小无关。

我们把内阻为



理想电压源，又

称恒压源。

二、电流源

具有较高内阻的电源输出的电流较为恒定，常用**电流源**来表征。

实际使用的稳流电源、光电池等可视为电流源。

内阻无穷大的电源称为**理想电流源**，又称**恒流源**。

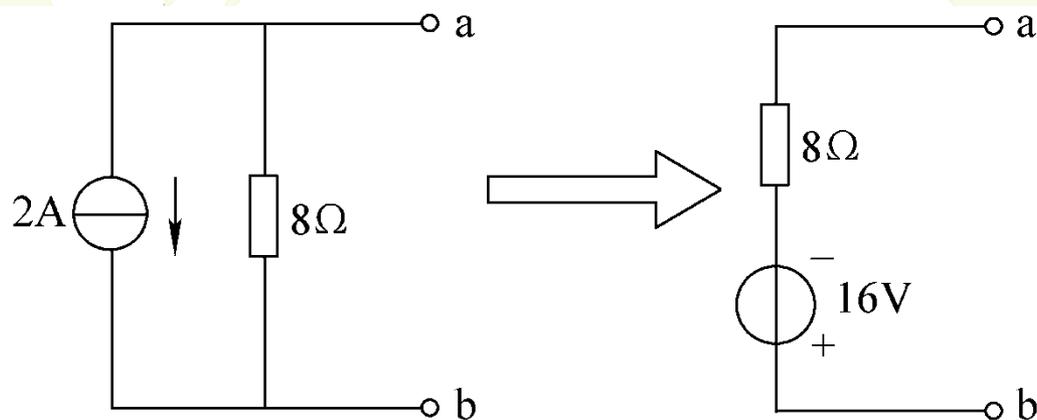
理想电压源与理想电流源不能进行等效变换。

恒压源输出电压恒定，恒流源没有这样的性质；同样，恒流源输出电流恒定，恒压源也没有这样的性质。因此二者不能进行等效变换。

将**电流源**转换为**电压源**

$$E = I_S r = 2 \times 8 = 16\text{V} \quad \text{内阻不变}$$

电压源正负极参考方向与电流源电流的参考方向一致。



注意

电压源与电流源等效变换时，应注意：

1. 电压源正负极参考方向与电流源电流的参考方向在变换前后应保持一致。
2. 两种实际电源模型等效变换是指外部等效，对外部电路各部分的计算是等效的，但对电源内部的计算是不等效的。

1.6.1 电路的3种状态

1. 开路状态



播放动画

开路又称为断路，是电源和负载未接通时的工作状态。

典型的开路状态如图 1-35 所示

电源开路时的电路特征如下。

- (1) 电路中的电流 $I = 0$ 。
- (2) 电源两端的开路电压 $U_{OC} = E$ ，负载两端的电压 $U = 0$ 。
- (3) 电源产生的功率与负载转换的功率均为零，即 $P_E = P = 0$ 这种电路状态又称为电源的空载状态。

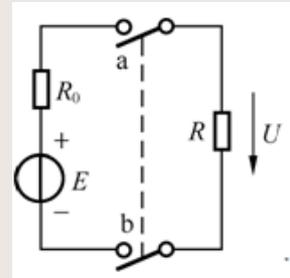


图 1-35 开路状态



2. 短路状态

短路是指电源未经负载而直接由导线（导体）构成通路时的工作状态。

图 1-36（a）所示电路是电源被短接的情况，其等效电路如图 1-36（b）所示。

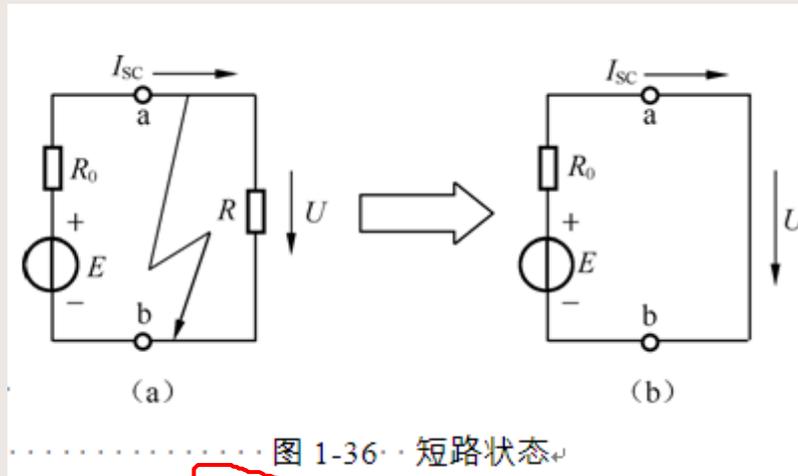
电源短路状态的特征如下：

电路中短路电流为 $I_{\text{短}} = E / r$

负载上电流为 $I = 0$

负载上电压为 $U = E - I_{\text{短}} r = 0$

电源发出及负载转换的功率均为零，即 $P = 0$ ；电源产生的功率全消耗在内阻上，即 $P_E = I^2 R_0$



3. 有载工作状态

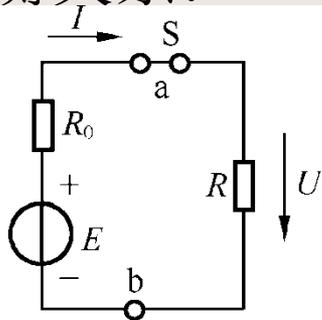
图 1-37 (a) 所示电路中，开关 S 闭合后，电源与负载接通构成回路，电路中产生了电流，并向负载输出电功率，即电路中开始了正常的功率转换，电路的这种工作状态称为有载工作状态。

电路有载工作状态的特征如下：

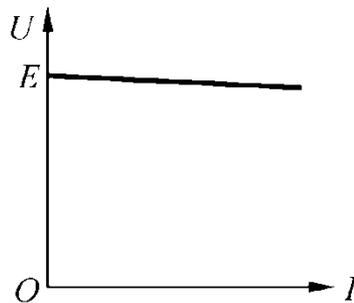
① 电路中的电流：
$$I = \frac{E}{R + R_0}$$

② 负载端电压：
$$U = IR = E - IR_0$$
 电源的外特性曲线如图 1-37 (b) 所示。

③ 功率平衡关系：
$$P = P_E - \Delta P$$



(a) 有载工作状态



(b) 电源的外特性曲线



3.1.1 正弦交流电的三要素



正弦交流电的数值随时间按正弦规律变化，方向也随时间反复变化。

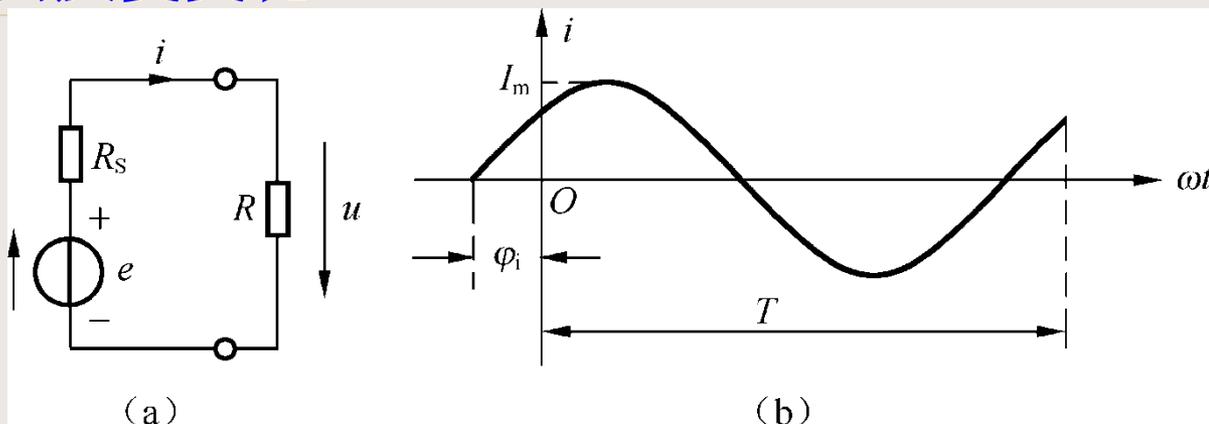


图 3-2 正弦电量的正方向和波形图
与该波形图相对应的正弦电流 i 的数学表达式
为

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i)$$

正弦交流电动势、正弦交流电压的瞬时值表达式分别表示为

$$e = E_m \sin(\omega t + \varphi_e)$$

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi_u)$$



1. 最大值（振幅）

正弦交流电瞬时值中的最大值也称为幅值。正弦交流电、电动势、电压的最大值（或幅值）分别用 I_m 、 E_m 、 U_m 表示。

2. 周期、频率、角频率

周期、频率、角频率都可以表征正弦电量随时间变化的快慢。

周期 T ：正弦量变化一次所需的时间称为周期，其单位为秒（s）。

频率 f ：正弦量每秒变化的次数称为频率，其单位为赫兹（Hz）。

$$f = \frac{1}{T} \quad \omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

角频率 ω ：正弦交流电每秒变化的电角度，其单位为弧度/秒（rad/s）。

某正弦交流电的频率 $f=50\text{Hz}$ ，求其周期 T 和角频率

$$\omega \quad T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0.02(\text{s}) = 20(\text{ms}) \quad \omega = 2\pi f = 2 \times 3.14 \times 50 = 314(\text{rad/s})$$



3. 初相位

正弦交流电在任一瞬时的电角度 ($\omega t + \varphi_u$)、($\omega t + \varphi_i$)、($\omega t + \varphi_e$) 等称为相位角，简称相位，其单位为弧度 (rad)。当 $t=0$ 时正弦电量的相位角称为初相位，简称初相。

规定初相角绝对值都小于等于 π ，即

$$|\varphi| \leq \pi$$

如图 3-4 所示，由纵轴左边的零值点确定的初相角为 φ_i ，由纵轴右边的零值点确定的初相角为 $-\varphi_i'$ ，根据初相角绝对值的规定，可判断该正弦电流的初相角应为 φ_i ，而不是 $-\varphi_i'$ 。

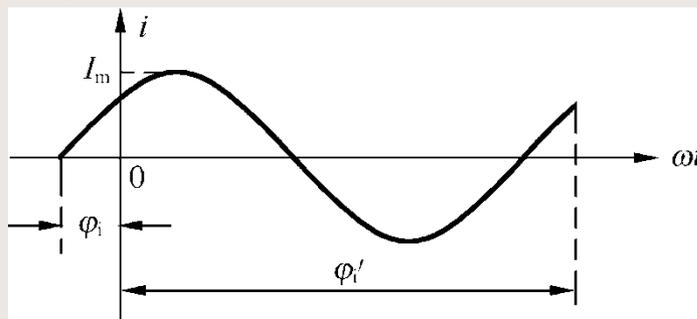
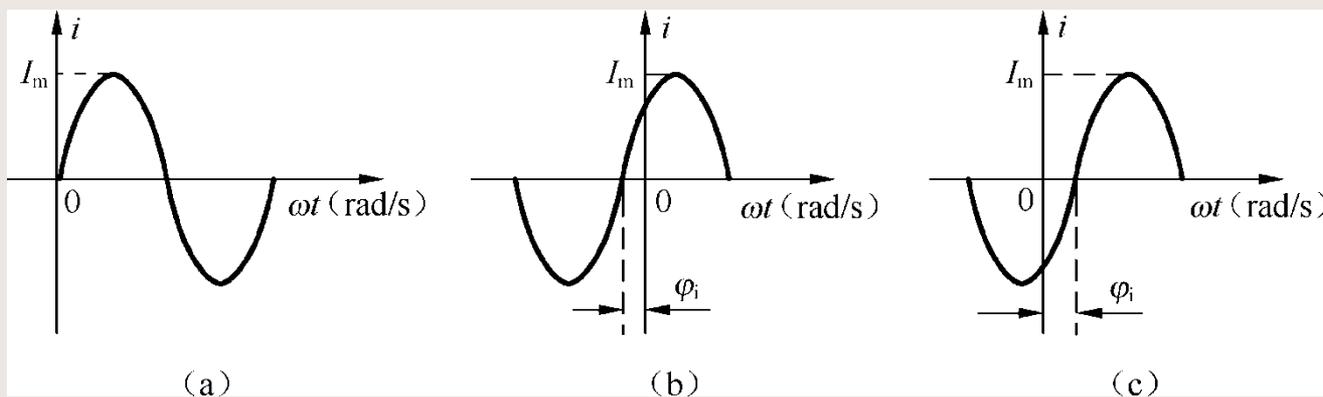


图 3-4 正弦电量的初相角



例 3-2 判断图 3-5 中正弦电量波形图的初相角，并写出对应的瞬时值表达式。

解：在图 3-5 (a) 中，正弦电量的零点与计时起点重合，其初相角 $\varphi_i = 0$ 。其对应的表达式为 $i = I_m \sin \omega t$ 。



在图 3-5 (b) 中，正弦电量的零点在计时起点之前，其初相角为 φ_i ， $\varphi_i > 0$

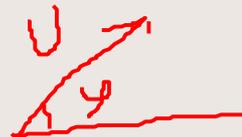
其对应的表达式为 $i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i)$

在图 3-5 (c) 中，正弦电量的零点在计时起点之后，其初相角为 $-\varphi_i$

其对应的表达式为 $i = I_m \sin(\omega t - \varphi_i)$



3.2.2 正弦量的相量表示法



1. 用相量表示正弦量

能表示正弦量特征的复数称为相量。为了与一般的复数相区别，相量用一个上面加黑点的大写英文字母表示，加黑点表示该相量是时间的函数。例如， I 表示正弦电流的相量， U 表示正弦电压的相量， E 表示正弦电动势的相量。相量的模表示正弦量的有效值，相量的幅角表示正弦量的初相角。其中，模为最大值的相量称为最大值相量。

2. 相量图

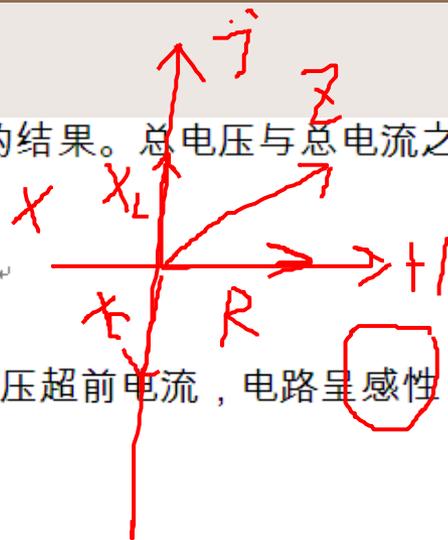
表示正弦量的相量也可以在复平面上用矢量来表示，相量在复平面上的几何表示（矢量图）称为相量图。

注意：单位相同的正弦电量对应相量的长度应成比例。图中各正弦量的频率必须一致，不同频率的正弦量不能画在同一个相量图上。



3.4.4 RLC串联电路的性质

RLC 串联电路中，电抗 $X = X_L - X_C$ ，是电感和电容共同作用的结果。总电压与总电流之间的相位差 φ 决定了电路的性质，它由电抗 X 的大小和正负来确定。



① 当 $X_L > X_C$ (即 $\omega L > \frac{1}{\omega C}$) 时， $X > 0$ ，阻抗角 $\varphi > 0$ ，总电压超前电流，电路呈感性，

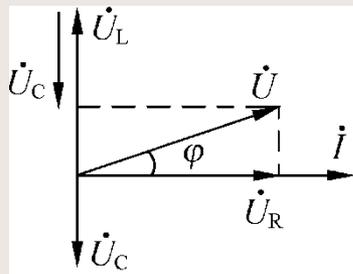
其相量图如图 3-25 (a) 所示。

② 当 $X_L < X_C$ (即 $\omega L < \frac{1}{\omega C}$) 时， $X < 0$ ，阻抗角 $\varphi < 0$ ，总电压滞后电流，电路呈容性，

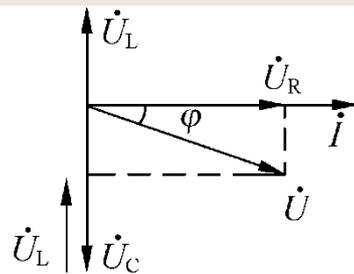
其相量图如图 3-25 (b) 所示。

③ 当 $X_L = X_C$ (即 $\omega L = \frac{1}{\omega C}$) 时， $X = 0$ ，阻抗角 $\varphi = 0$ ，总电压与电流同相，电路呈电

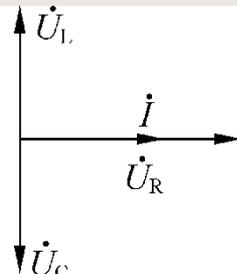
阻性，这时称电路发生了谐振，其相量图如图 3-25 (c) 所示。



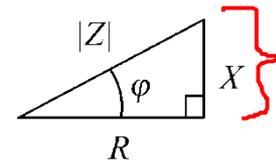
(a) $X > 0$



(b) $X < 0$



(c) $X = 0$



(b) 阻抗三角形



3.6.2 功率因数的提高

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{UI\cos\varphi}{UI}$$

1. 提高功率因数的意义

(1) 提高电源设备的利用率。

(2) 降低输电线路上的功率损耗，减少线路上的电压降。



4.2 三相电源的连接

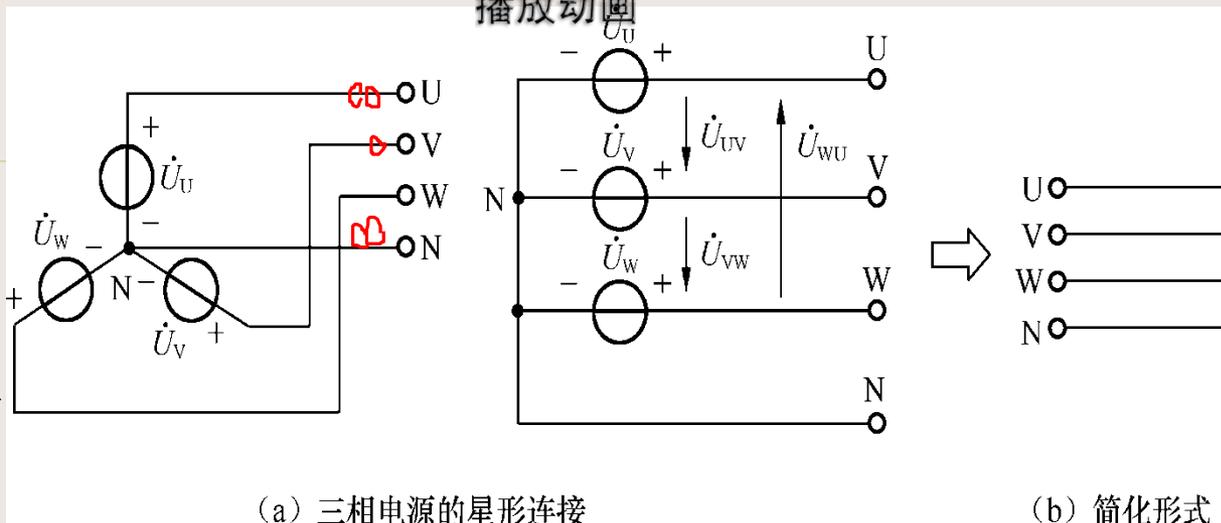


播放动画

4.2.1 三相电源的星形连接

1. 三相电源的星形（Y）连接

三相电压源的星形（Y）连接方式如图 4-3（a）所示。把三相电压源的负极（三相绕组的尾端）连在一起，向外引出一根输电线 N，我们称这根输电线 N 为电源的中性线，简称中线（俗称零线）；由三相电压源的正极（三相绕组的首端）向外引出 3 根输电线称为端线或相线，俗称火线，分别用 U、V、W 表示。电源绕组按这种接线方式向外供电的体制称为三相四线供电制，如图 4-3 所示



三相四线供电制能提供以下两种电压。



(1) 线电压

火线与火线之间的电压称为线电压，分别用 u_{UV} 、 u_{VW} 、 u_{WU} 表示，其对应的相量式分别为 \dot{U}_{UV} 、 \dot{U}_{VW} 、 \dot{U}_{WU}

各线电压的下脚标同时表示出了线电压的正方向。



(2) 相电压

火线与中线间的电压称为相电压，分别用 u_U 、 u_V 、 u_W 表示，其对应的相量式分别为 \dot{U}_U 、 \dot{U}_V 、 \dot{U}_W

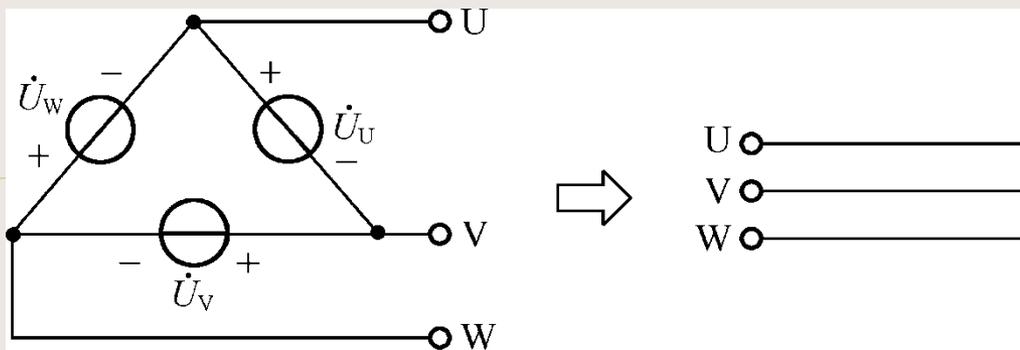
各相电压的下脚标只有一个字母，实际上表示了相电压的正方向由相线指向中线（或零线）N。

三相电源的星形（Y）连接方式中各正弦量的相量表示形式及其正方向标注如图 4-3（a）所示。



4.2.2 三相电源的三角形连接

1. 三相电源的三角形(Δ)连接



把3个电源绕组依次首尾相接连成一个闭环，从两个绕组的连接点分别向外引出3根火线U、V、W，电源绕组按这种接线方式向外供电的体制称为三相三线供电制，可简化为图4-5 (b)所示的形式。显然这种连接方式只能向负载提供一种电压，即电源的线电压。

2. 三相电源的三角形(Δ)连接时线电压与相电压的关系

电源的线电压与相电压的关系：
$$\overset{\text{线}}{U}_{UV} = U_U$$

对称三相电源三角形连

$$\overset{\text{线}}{U}_{VW} = U_V$$

接时数量关系为：
$$U_L = U_p$$

$$\overset{\text{线}}{U}_{WU} = U_W$$



4.3.2 三相负载的星形（Y）连接

1. 三相负载的星形连接

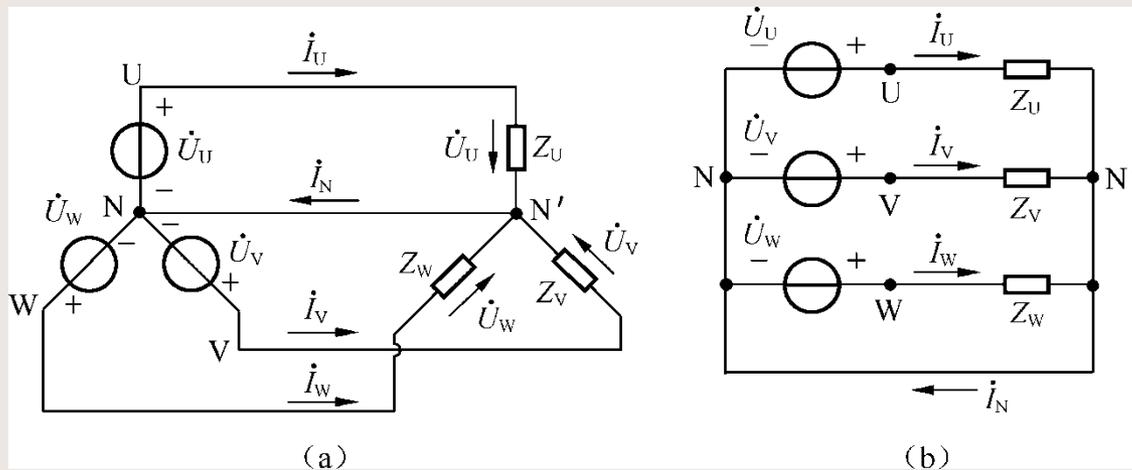


播放动画

三相负载的星形连接：将每相负载分别接在电源的相线（火线）和中性（零线）之间的连接方式。

负载的中性点

：三相负载连接在一起的点 N' 为负载的中性点。



三相负载星形连接电路的共同特点是：三相负载的一端连在一起与中线相接，另一端分别与电源的相线相接。



2. 三相负载星形连接时线电量与相电量之间的关系

(1) 三相负载星形连接时线电压与相电压的关系

① 负载的相电压：负载两端的电压称为负载的相电压。若忽略输电线路上的电压降时，负载的相电压就等于电源的相电压。

② 负载的线电压：相线（火线）与相线之间的电压称为负载的线电压。显然负载的线电压就是电源的线电压。

$$U_L = \sqrt{3} U_p$$

③ 线电压与相电压的关系：

当 3 个相电压对称时，3 个线电压也对称。



(2) 三相负载星形连接时线电流与相电流的关系

① 负载的相电流：流过每相负载的电流称为负载的相电流。

② 负载的线电流：流过相线或端线的电流称为负载的线电流。

$$I_U^{\text{相}}、I_V^{\text{相}}、I_W^{\text{相}}$$

对称负载线电流的有效值统一用 I_L 表示。三相线电流的正方向规定为从电源端流向负载端。

由图 4-11 可看出，负载的线电流等于对应相负载的相电流，即 $I_L^{\text{相}} = I_P$



3. 三相负载星形连接时的电路特点

三相负载星形连接且连有中线时，不论负载是否对称，均有以下电路特点：

$$U_L = \sqrt{3} U_P$$

数量关系： $U_P = \frac{1}{\sqrt{3}} U_L$

相位关系： 线电压超前对应的相电压 30°

$I_P = I_L$ 线电流等于相电流。

数量关系： $I_P = I_L$

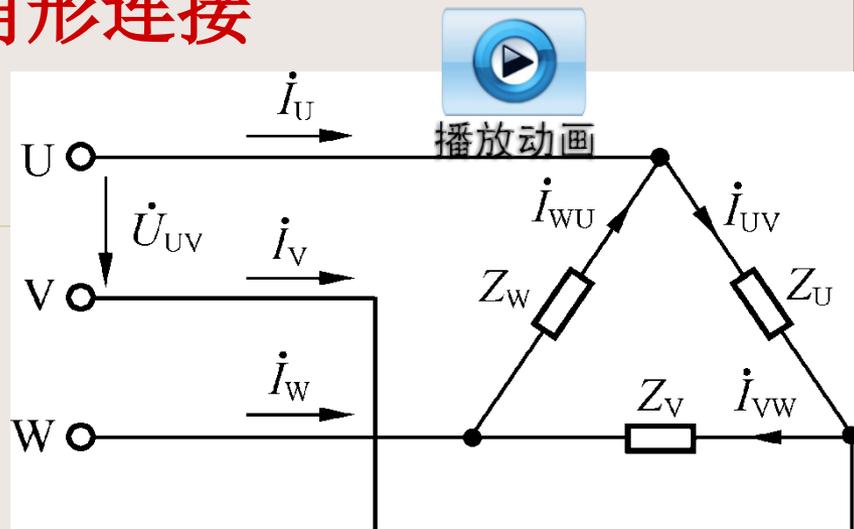
相位关系： 线电流与对应的相电流的相位相等



4.3.3 三相负载的三角形连接

1. 三相负载的三角形连接

把三相负载分别接在三相电源的每两根端线之间的连接方式，称为三相负载的三角形连接。其简化电路电路如图 4-11 所示



2. 三相负载三角形连接时线电量与相电量之间的关系

三相负载三角形连接电路相电压 U_{UV} 及各相电流、线电流的正方向标定如图 4-11 所示。

(1) 负载的相电压就等于电源的线电压。 $\dot{U}_L = \dot{U}_P$

数量关系： $U_P = U_L$

相位关系： 线电压与对应相电压的相位相等



(2) 负载的线电流等于对应两相电流的差

三相负载对称时有：

数量关系： $I_P = \sqrt{3}I_L$

相位关系： 线电流滞后对应的相电流 30°

$$I_U^{\text{线}} = I_{UV} - I_{WU}$$

$$I_V^{\text{线}} = I_{VW} - I_{UV}$$

$$I_W^{\text{线}} = I_{WU} - I_{VW}$$

3 . 三相负载三角形连接时的电路特点

不论三相负载是否对称，均有以下特点：

线电压等于相电压。

$$U_L^{\text{线}} = U_p$$

线电流不等于相电流。



4.4 三相负载星形连接电路的分析计算

4.4.1 三相对称负载星形连接电路的分析计算

1. 三相对称负载作星形连接时采用三相三线制

当各相负载的阻抗相同时，三相负载为对称三相负载

$$|Z_U| = |Z_V| = |Z_W| = |Z|, \quad \varphi_U = \varphi_V = \varphi_W = \varphi$$

若 $U_U = U_P$

则

$$I_U = \frac{U_U}{Z_U} = \frac{U_P}{|Z|} \angle -\varphi = \frac{U_P}{|Z|} \angle -\varphi$$

$$I_V = \frac{U_V}{Z_V} = \frac{U_P}{|Z|} \angle (-\varphi - 120^\circ) = \frac{U_P}{|Z|} \angle (-\varphi - 120^\circ)$$

$$I_W = \frac{U_W}{Z_W} = \frac{U_P}{|Z|} \angle (+\varphi - 120^\circ) = \frac{U_P}{|Z|} \angle (+\varphi - 120^\circ)$$

即 $I_U = I_V = I_W = I_P = \frac{U_P}{|Z|}$

各相电流的相位互差 120°

中线电流为零可去掉

$$I_N = I_U + I_V + I_W = 0$$



特别提示： 当三相负载对称时，三相电流也对称，此时中线电流为零，可去掉中线。

中线的作用：使星形连接的不对称三相负载得到对称的相电压。



4.4.2 三相不对称负载星形连接电路的分析计算

1. 三相不对称负载作星形连接时采用三相四线制

2. 三相不对称负载星形连接时的分析计算

当中线存在时，负载的相电压等于电源的相电压，即负载电压仍然是对称的。

$$U_L = \sqrt{3}U_p \quad I_L = I_p$$

各相
电流
分别
计算

$$\dot{i}_u = \frac{\dot{U}_u}{Z_u} \quad I_u = \frac{U_p}{|Z_u|}$$

$$\dot{i}_v = \frac{\dot{U}_v}{Z_v} \quad I_v = \frac{U_p}{|Z_v|}$$

$$\dot{i}_w = \frac{\dot{U}_w}{Z_w} \quad I_w = \frac{U_p}{|Z_w|}$$

$$\dot{i}_N = \dot{i}_u + \dot{i}_v + \dot{i}_w \neq 0$$

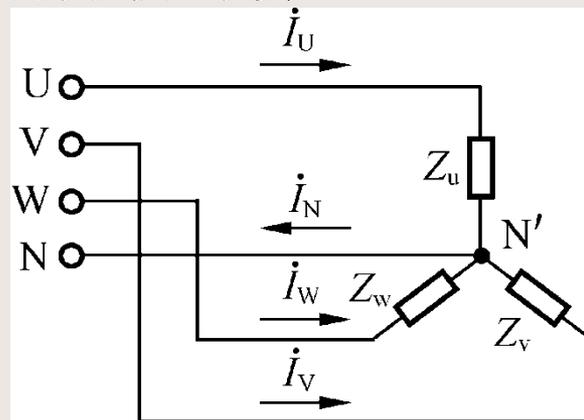


图 4-17 三相不对称负载星形连接

中线不允许断开



3. 不对称三相负载中线的作用

中性线的作用：是使星形连接的三相不对称负载成为3个独立的电路，不论负载大小如何变动，每相负载承受的对称相电压不变，故各相负载均能正常工作。

中性线一旦断开，即使电源线电压对称，但因各相负载所承受的相电压不相等，将使负载不能正常工作，严重时会造成重大的事故。

因此在三相四线制供电系统中，在中性线上不允许安装开关及熔断器，并且中性线必须安装牢固。

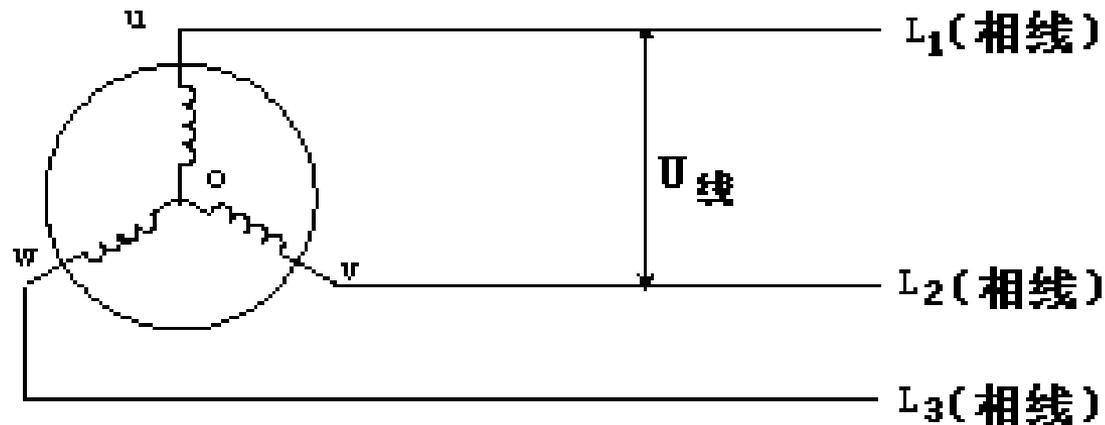
实际应用时，中线常用细钢丝制成，以免中线断开发生事故。为了减少中线电流，应力求三相负载对称。例如，三相照明负载应尽量平均分接在三相电源上，避免出现全部负载集中在一相上的情况。



三相交流电力系统供电制式简介

1. 三相三线制系统

当发电机（或变压器）的绕组接成星形接法，但不引出中性线时，就形成了三相三线制系统，这种接法只能提供一种电压，即线电压。

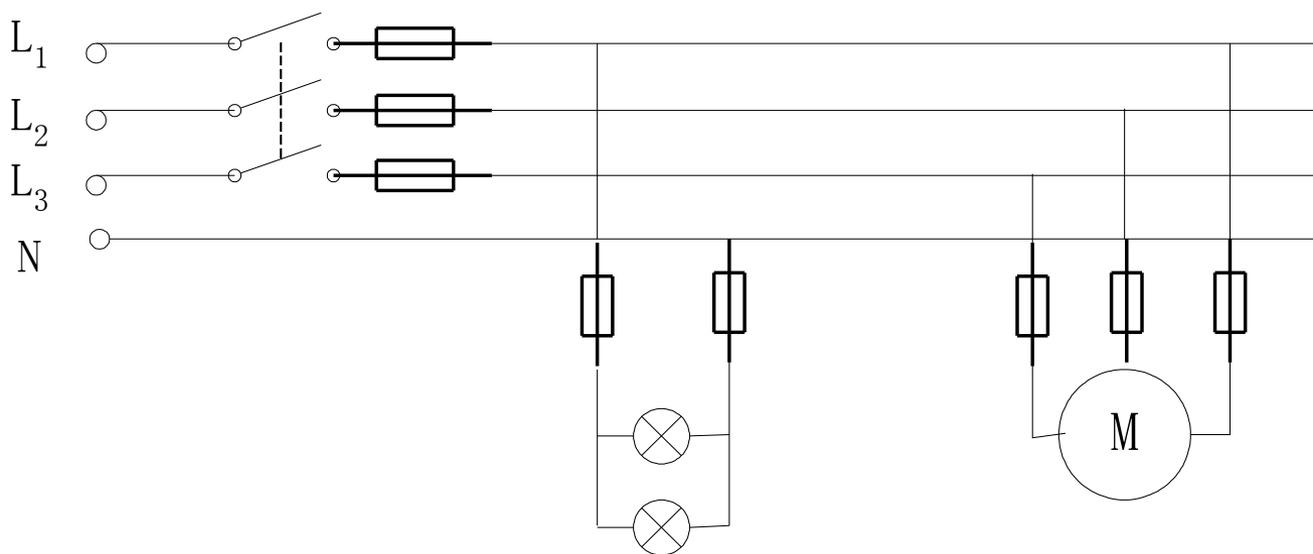


三相三线制系统

三相交流电力系统供电制式简介

2. 三相四线制系统

通常我国的低压配电系统是采用相电压为 220V，线电压为 380V 三相四线制配电系统。

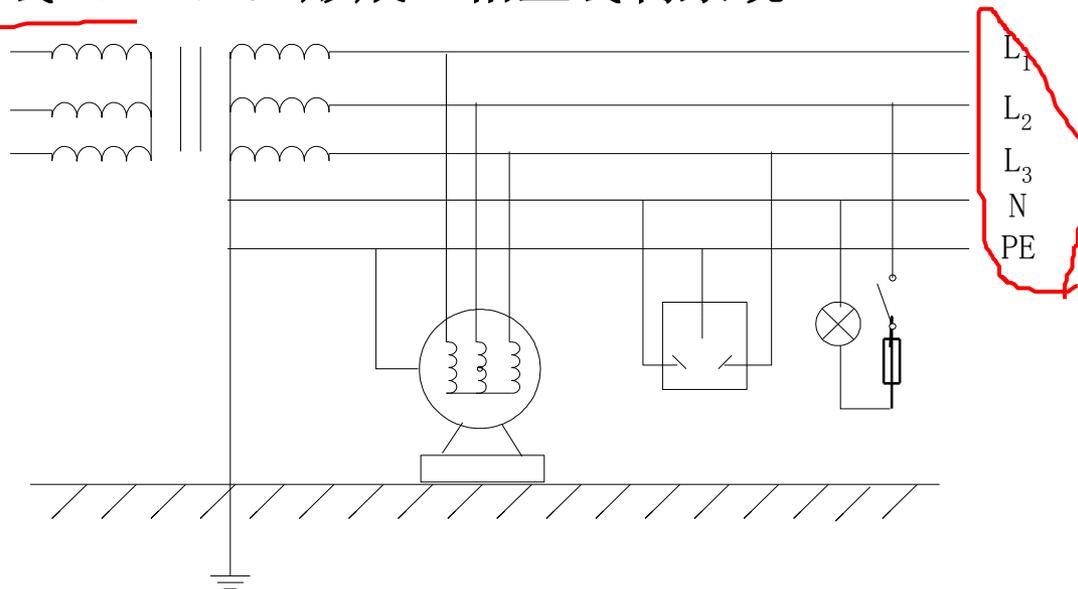


三相四线制系统

三相交流电力系统供电制式简介

3. 三相五线制系统

由于运行和安全的需要，我国的 380V/220V 低压供配电系统广泛采用电源中性点直接接地的运行方式（这种接地方式称为工作接地），同时还引出中性线（N）和保护线（PE），形成三相五线制系统。



三相五线制系统

安全电压标准及适用场合

我国规定工频有效值 12V、24V、36V 三个电压等级为安全电压级别。

凡手提照明灯具，在危险环境、特别危险环境的局部照明灯，高度不足 2.5 米的照明灯，携带式电动工具等，若无特殊安全结构或安全措施，应采用 24V 或 12V 安全电压。

金属容器内、隧道内、矿井内等工作地点狭窄、行动不便、湿度大，以及周围有大面积接地导体的环境，应采用 12 V 安全电压。当电气设备采用 24V 以上的安全电压时，必须采取直接接触电击的防护措施。

